

## КЛИМАТИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ НА ТЕРРИТОРИИ РОССИИ И РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ В XX-XXI ВЕКАХ

*Переведенцев Ю.П.<sup>1</sup>, Лопух П.С.<sup>2</sup>, Гледко Ю.А.<sup>2</sup>, Шерстюков Б.Г.<sup>3</sup>, Шанталинский К.М.<sup>1</sup>,  
Мирсаева Н.А.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Казанский (Приволжский) федеральный университет, [ureved@kpfu.ru](mailto:ureved@kpfu.ru)

<sup>2</sup>Белорусский государственный университет (г. Минск, Республика Беларусь),  
[loruch49@mail.ru](mailto:loruch49@mail.ru)

<sup>3</sup>Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации–  
Мировой центр данных (г. Обнинск, Калужская область), [boris\\_sher@mail.ru](mailto:boris_sher@mail.ru)

Доклад посвящен оценке изменений температуры воздуха и атмосферных осадков на территории России и Республики Беларусь в период 1976-2019 гг. и их климатическим последствиям. Главное внимание уделено анализу трендов указанных характеристик, что позволило выявить пространственно-временные особенности потепления климата в последние десятилетия. Установлена статистическая связь между индексами атмосферной циркуляции (NAO, AO, EAWR, SCAND) с колебаниями температуры воздуха на Европейской территории России и Республики Беларусь.

Рассмотрим вначале тенденции изменения температурно-влажностного периода на территории России в периоды 1976-2019 и 2001-2019 гг. по данным 1250 метеорологических станций, в затем климатические процессы происходящие на Европейской части России (ЕЧР) и Республики Беларусь по данным 95 длиннорядных станций (1900-2019 гг.).

Многолетние ряды исходных данных подвергались статистической обработке – находились средние величины, средние квадратические отклонения (СКО), аномалии температуры воздуха (ТВ) и атмосферных осадков, линейные тренды температуры и осадков для 2-х указанных периодов. Выделение низкочастотного компонента (НЧК) в метеорологических рядах осуществлялись с помощью фильтра Поттера с точкой отсечения 10 лет и более. Достоверность результатов оценивалась с помощью критерия Фишера.

Были построены карты линейных трендов для температуры воздуха и осадков для годовых значений и центральных месяцев сезонов, что позволило проанализировать особенности современного потепления климата на обширной территории. Так, в январе в период 1979-2019 гг. наибольшая скорость потепления наблюдается в Средней Сибири, арктическом побережье и арктических островах от Новой Земли до Новосибирских островов, где величина коэффициента наклонного тренда (КНЛТ) достигает  $1,2^{\circ}\text{C}/10$  лет, на Европейской части России (ЕЧР) (за исключением северо-запада) и в Беларуси значения КНЛТ меняются в пределах  $0,20-0,59^{\circ}\text{C}/10$  лет. В апреле вся территория ЕЧР и Беларуси охвачена потеплением с максимумом на северо-востоке, где КНЛТ достигает значения  $1,2^{\circ}/10$  лет. На востоке Беларуси КНЛТ =  $0,6^{\circ}\text{C}/10$  лет. В июле запад и юго-запад ЕЧР, а также территория Беларуси заняты достаточно интенсивной областью потепления (КНЛТ в районе Минска достигает  $0,8^{\circ}\text{C}/10$  лет). На большей части территории России преобладает достаточно слабый рост ТВ со скоростью от  $0,2$  до  $0,59^{\circ}\text{C}/10$  лет. В октябре наиболее интенсивный рост ТВ наблюдается на севере Сибири, где КНЛТ достигает  $1,2^{\circ}\text{C}/10$  лет, на востоке ЕЧР КНЛТ =  $0,8^{\circ}\text{C}/10$  лет, на западе ЕЧР как и в Беларуси процесс потепления менее заметны (КНЛТ ~  $0,4^{\circ}\text{C}/10$  лет). Тренды среднегодовой температуры свидетельствуют о потеплении климата на всей территории России и Беларуси. Причем в центре ЕЧР потепление происходит с меньшей скоростью, чем в Беларуси, где КНЛТ достигает  $0,6^{\circ}\text{C}/10$  лет.

Коэффициенты наклона линейного тренда рассчитанные для периода 2001-2019 гг. заметно отличаются от ранее рассмотренных. Так, в январе практически вся территория ЕЧР и Беларуси испытывает похолодание (на территории Беларуси КНЛТ =  $-1,0^{\circ}\text{C}/10$  лет). В июле также тренд отрицателен, скорость похолодания наибольшая на северо-западе ЕЧР ( $-1,5^{\circ}\text{C}/10$  лет), а в Беларуси КНЛТ =  $-1,0^{\circ}\text{C}/10$  лет. Однако годовая картина свидетельствует о потеплении климата на всей Европейской территории России и в Беларуси, где КНЛТ =

0,5°C/10 лет. Понижение температуры воздуха в январе и июле объясняется, так называемой, 15-летней паузой в глобальном потеплении климата в начале 21 века.

Картина в распределении атмосферных осадков по месяцам более неоднородна, чем годовая. Тренды, построенные по годовым значениям сумм осадков, свидетельствуют об их усилении на большей территории России за исключением центра и юга ЕЧР, где КНЛТ ~ -10-14 мм/год. Распределение атмосферных осадков на территории Беларуси более однородное.

Климатические изменения нашли отклик в ряде прикладных показателей. Продолжительность отопительного периода ( $CCT \leq 8^\circ C$ ) в 1976-2019 гг. на всей территории России сократилась, особенно на арктическом побережье Западной и Средней Сибири, где скорость ее уменьшения составила 4-5 дней/10 лет, на большей части территории России эта величина составила 2-3 дня/10 лет.

В период 2001-2019 гг. картина резко изменилась. Так, в центральной части и на юго-востоке ЕЧР, на юге Западной Сибири продолжительность отопительного периода (ОП) увеличивалась со скоростью на 6-7 дней/10 лет, на севере ЕЧР, Западной Сибири, наоборот, уменьшилась со скоростью 5-6 дней/10 лет, пространственная картина тенденций изменения ОП неоднородная (на значительной части Сибири продолжительность ОП сократилась со скоростью 2-3 дня/10 лет).

Продолжительность вегетационного периода (средняя суточная температура ( $CCT$ ) выше  $5^\circ C$ ) возрастала в период 1976-2019 гг. по всей территории России с различной скоростью. Наибольшая скорость отмечена на о. Новая Земля (12 дней/10 лет), а наименьшая на юге и юго-востоке ЕЧР (0-1 дней/10 лет). На большей части ЕЧР и Сибири продолжительность вегетационного периода возрастала со скоростью 2-3 дня/10 лет. Картина выглядит значительно контрастнее в период 2001-2019 гг. В этом случае на севере ЕЧР и Западной Сибири продолжительность вегетационного периода растет со скоростью 8-9 дней/10 лет, а на значительной территории ЕЧР, Сибири и Приморья, наоборот, уменьшается со скоростью 2-3 дня/10 лет. Сказывается влияние паузы потепления в начале XXI века.

В качестве интегральной характеристики аномальности поля температуры воздуха на ЕЧР использовались параметры Багрова ( $K$ ) и Токарева ( $K_T$ ), позволяющие оценивать не только величину аномалии  $\Delta$ , но и ее знак. Параметры  $K$  и  $K_T$  рассчитывались по формулам:

$$K = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left( \frac{\Delta T_i}{\sigma_i} \right)^2 \quad (1)$$

$$K_T = \frac{1}{N + M} \left[ \left[ \sum_{i=1}^N \left( \frac{\Delta T_{+i}}{\sigma_i} \right)^2 \right] - \left[ \sum_{i=1}^M \left( \frac{\Delta T_{-i}}{\sigma_i} \right)^2 \right] \right] \quad (2)$$

где  $N$  – количество точек с положительной аномалией температуры  $T_+$ ,  $M$  – количество точек с отрицательной аномалией температуры  $T_-$ ,  $\sigma$  – среднее квадратическое отклонение температуры в точке  $i$ .

В том случае, когда площадь, занятая аномалией одного знака, превышает 70%, величина параметра  $K_T$  резко увеличивается [2]. При  $K < 0,6$  аномальность можно считать малой, при  $0,6 \leq K \leq 1,1$  – средней, при  $1,1 \leq K \leq 1,6$  – значительной, при  $1,6 \leq K \leq 2,1$  – крупной и при  $K > 2,1$  экстремальной.

По данным 95 станций, расположенных на ЕЧР и Республики Беларусь в период 1900-2019 гг. рассчитывался многолетний ход индексов аномальности  $K$  и  $K_T$  приземной температуры в зимний и летний сезоны и за год. Выявилось, что, рассчитанные по среднегодовым значениям температуры индексы Токарева, начиная с 1999 г., оказывались положительными, что свидетельствует о преобладании положительной аномалии температуры на рассматриваемой территории за последние 20 лет.

Анализ многолетнего хода индексов  $K$  и  $K_T$  по сезонам показывает значительную межгодовую изменчивость. При этом, если зимой наблюдалось 11 случаев экстремальных

значений индекса К ( $K > 2,0$ ), то летом 14. В процентном отношении это составляет 9 и 12% соответственно. Наибольшие значения индексов приходятся на знойное лето 2010 г. ( $K = K_T = 7,6$ ).

Для оценки экстремальности зим на ЕЧР в период 1900-2019 гг. использовался метод А.В. Мещерской [1], согласно которому интегральный показатель аномальности зим ( $\alpha$ ) определяется по формуле:

$$\alpha = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \frac{1}{2} \left( \frac{\Delta t_I}{\sigma_I} + \frac{\Delta t_{II}}{\sigma_{II}} \right)_K \quad (3)$$

где N – число метеорологических станций (95),  $\frac{\Delta t_I}{\sigma_I}, \frac{\Delta t_{II}}{\sigma_{II}}$  – нормированные аномалии температуры воздуха по станциям (K) за январь и февраль соответственно,  $\sigma_I, \sigma_{II}$  – средние квадратические отклонения температуры для этих месяцев.

При  $\alpha < -0,9$  на ЕЧР зима считается экстремально холодной, а при  $\alpha > 1,0$  экстремально теплой. Согласно расчетам, экстремально холодные зимы были в 1911, 1912, 1917, 1929, 1940, 1942, 1950, 1954, 1956, 1969, 1972, 1985, а экстремально теплые в 1925, 1944, 1995, 2002 гг. При этом величина коэффициента линейного тренда показателя  $\alpha$  КНЛТ = 0,047 ед/10 лет, что свидетельствует о потеплении зим на ЕТР. Вклад в общую дисперсию исходного ряда  $\alpha$  низкочастотной компоненты с периодом более 15 лет составил 17%. Ход НЧК индекса суровости зим  $\alpha$  выявил временные участки, на которых отмечалась наибольшая скорость похолодания (потепления) зим. Так, с 1971 по 1997 гг. отмечается наибольшая скорость роста  $\alpha$  (потепление зим), затем в 1997-2009 гг. (12 лет) наблюдалось похолодание зим и с 2010 по 2019 гг. вновь наблюдалось потепление зим. При этом коэффициент корреляции между индексами  $\alpha$  и  $K_T$  достигает значения 0,86.

С целью выявления долговременных тенденций изменения термического режима построены линейные тренды температуры воздуха для каждого из месяцев зимнего и летнего сезонов, годовых значений. Для выделения температурных долговременных колебаний в период 1900-2019 гг. рассчитывались низкочастотные компоненты (НЧК) с периодом более 20 лет. Результаты расчетов представлены в таблице 1.

Как видно из табл. 1, на рассматриваемой территории хорошо проявляется годовой ход ТВ с минимумами в январе ( $-11,30^\circ\text{C}$ ) и максимумами в июле ( $18,38^\circ\text{C}$ ). Годовая амплитуда составляет  $29,68^\circ\text{C}$ . Средние квадратические отклонения ТВ меняются в пределах от  $3,19^\circ\text{C}$  (февраля) до  $1,24^\circ\text{C}$  (август). Наибольшее значение коэффициента наклонного линейного тренда (КНЛТ) приходится на март ( $0,290^\circ\text{C}/10$  лет), а наименьшее на август ( $0,068^\circ\text{C}/10$  лет). Выделяется также декабрь, где КНЛТ= $0,226^\circ\text{C}/10$  лет. Таким образом, по осредненным данным по территории во все месяцы года наблюдается потепление, но с различной интенсивностью. Как видно из табл. 1, осредненное за год значение КНЛТ равно  $0,147^\circ\text{C}/10$  лет, при этом в зимний период скорость потепления ( $A=0,190^\circ\text{C}/10$  лет) вдвое превышает летнюю скорость потепления ( $A=0,081^\circ\text{C}/10$  лет). В целом средняя годовая ТВ всей рассматриваемой территории составляет  $3,45^\circ\text{C}$ , СКО= $0,96^\circ\text{C}$ , а скорость потепления составляет  $0,147^\circ\text{C}/10$  лет.

**Таблица 1. Характеристики изменения осредненной по территории Европейской части России и Беларуси температуры воздуха в период 1900-2019 гг.**

Месяц	$A_v, ^\circ\text{C}$	$R_{ms}, ^\circ\text{C}$	$A, ^\circ\text{C}/10 \text{ лет}$	$R^2L, \%$	$R^2F, \%$
I	-11,30	3,02	0,165	2	12
II	-10,54	3,19	0,195	3	12
III	-4,95	2,50	0,290	15	24
IV	3,68	1,95	0,161	7	12
V	10,68	1,75	0,171	10	17
VI	15,89	1,33	0,081	3	11
VII	18,38	1,30	0,094	5	15
VIII	16,49	1,24	0,068	2	23
IX	10,84	1,34	0,090	4	15
X	3,83	1,78	0,127	5	15
XI	-3,12	2,20	0,094	1	18
XII	-8,51	2,83	0,226	6	12
I-XII	3,45	0,96	0,147	27	38
XII-II	-9,60	2,07	0,190	9	15
VI-VII	16,92	0,90	0,081	8	22

Примечание:  $A_v$  – среднее значение ( $^\circ\text{C}$ ),  $R_{ms}$  – среднее квадратическое отклонение ( $^\circ\text{C}$ ),  $A$  – КНЛТ ( $^\circ\text{C}/10 \text{ лет}$ ),  $R^2L$  – коэффициент детерминации линейного тренда (%),  $R^2F$  – коэффициент детерминации низкочастотной компоненты (%).

К числу важнейших факторов влияющих на характер атмосферных процессов относится циркуляция атмосферы. С целью оценки ее влияния на температурный режим регионов России рассчитывались коэффициенты парной корреляции между среднемесячными значениями температуры воздуха 26 станций и индексами атмосферной циркуляции: NAO, AO, EAWR, SCAND в 1966 – 2019 гг. Достаточно тесные положительные связи выявлены для многих Европейских и Азиатских регионов в холодное время года с индексами NAO и AO, значимые отрицательные связи с индексом EAWR в теплое время года, с индексом SCAND значимые отрицательные связи для Сибирских городов на протяжении всего года.

1. Мещерская А.В., Голод М.П. Каталоги аномальности зим на территории России. Труды ГГО, вып. 579, 2015, с. 129-161.

2. Токарев В.Г. Об изменчивости и аномальности сравнений средней сезонной температуры воздуха в первую половину лета в Западной Сибири. Труды ЗапСиб НИИ Госкомгидромета, 1983, вып. 59, с. 20-26.